Influencia De La Interacción Suelo-Estructura En Edificación De Baja Altura

Influence Of The Soil-Structure Interaction In A Low-Rise Building

Autores

Aldo Fernández Limés¹, Willian D. Cobelo Cristiá²

¹Ingeniero civil, Universidad Tecnológica de la Habana ``José A. Echeverría'', Facultad de Ingeniería Civil, Calle 114 #11901, e/ Rotonda y Ciclovía, Marianao La Habana Cuba, <u>afernandezl@civil.cujae.edu.cu</u>

²Ingeniero civil, Doctor en ciencias técnicas, Universidad Tecnológica de la Habana ``José A. Echeverría´´, Facultad de Ingeniería Civil, Calle 114 #11901, e/ Rotonda y Ciclovía, Marianao La Habana Cuba, <u>wcobelo@civil.cujae.edu.cu</u>

RESUMEN

Los estudios de comportamiento estructural mediante modelación computacional frecuentemente desprecian la interacción suelo estructura (ISE) considerando a los apoyos empotrados, esta simplificación puede inducir imprecisiones en la respuesta estructural y subestimación o sobrestimación de las fuerzas interiores que se generan en los elementos de soporte vertical y horizontal, lo que puede conducir a errores en el diseño. Este trabajo analiza la influencia de la ISE en la respuesta estructural de una edificación de baja altura. La consideración de la ISE se analizó a través de modelos numéricos continuos y la no consideración de la ISE, mediante el enfoque tradicional de apoyos empotrados, con el objetivo de obtener la variación de las fuerzas interiores de los elementos estructurales. Fue necesaria la generación de elementos de interfase para simular el contacto entre la losa y el suelo en el modelo con interacción. Se determinó que la ISE provoca que se redistribuyan las fuerzas interiores de los elementos estructurales incrementando sus valores en unos casos y disminuyendo en otros. Por tanto, su efecto debe ser considerado en el diseño de edificaciones bajas sobre suelos deformables con cimientos superficiales.

Palabras claves: Interacción suelo-estructura (ISE), modelación computacional, suelo compresible.

ABSTRACT

Structural behavior studies using computational modeling frequently disregard the soil-structure interaction (SSI) considering fixed supports, this simplification can lead to inaccuracies in the structural response and underestimation or overestimation of internal forces, which can lead to design errors. This work analyzes SSI's influence over the structural response of a lowrise building. SSI consideration was analyzed through continuous numerical methods and the non-consideration through fixed supports, in order to obtain the variation of the internal forces of the structural elements. The generation of interface elements was necessary to simulate the contact between the slab and the ground in the model with interaction. It was determined that the SSI has causes the internal forces of the structural elements to be redistributed, increasing their values in some cases and decreasing in others. Therefore, its effect must be considered in the design of low-rise buildings on deformable soils with shallow foundations.

Keywords: Computational modelling, soft soil, soil-structure interaction (SSI).

Nota Editorial: Recibido: Septiembre 2022 Aceptado: Septiembre 2022

1. INTRODUCCIÓN

La interacción suelo estructura (ISE) es un fenómeno muy complejo y heterogéneo debido a la diversidad de causas que la generan, es por ello que no existe una definición única del problema. Según Kausel [1] la ISE se refiere al fenómeno estático o dinámico que ocurre entre una estructura rígida y el suelo bajo ella y para Garg, et al. [2] la ISE es sólo un fenómeno interdisciplinario que envuelve a la ingeniería estructural y geotécnica. La ISE es aquella parte de la ingeniería que estudia las deformaciones del terreno de cimentación cuando estas se ven afectadas por la presencia y rigidez de la propia estructura. Esta puede ser en condiciones, dinámicas[3] o estáticas[4].

Para dar solución a los problemas de ISE es necesario hacer simulaciones matemáticas que modelen el comportamiento más aproximado a la realidad del suelo a partir de seleccionar correctamente los modelos constitutivos. Todos los aspectos que influyen en la respuesta mecánica del suelo bajo condiciones determinadas de cargas no es posible tenerlas en cuenta, por lo tanto, se necesitan idealizaciones, tanto del material como de las condiciones de carga, para simplificar la expresión matemática. Estas idealizaciones incorporan las principales propiedades del material, excluyéndose los aspectos considerados de menor importancia. Estos modelos deben estar en función del tipo de análisis que se desee hacer (estático o dinámico) [2]. La búsqueda de modelos para describir la ISE se ha desarrollado básicamente en dos vertientes, los modelos discretos que tienen su base en la hipótesis de Winkler en donde el suelo se sustituye por resortes con una rigidez determinada [5] y los continuos donde el suelo es modelado de forma íntegra con la edificación en un solo paso [6], siendo esta idealización más cercana al comportamiento real, pero requieren de un mayor costo computacional, debido a que en su solución es necesario el empleo de métodos numéricos. Los estudios de ISE se han realizado para diferentes tipos de estructuras: edificaciones de gran altura, para torres de aerogeneradores, telecomunicaciones o de transmisión eléctrica[7]. Los parámetros que influyen en el comportamiento de la ISE son: la rigidez del suelo cuantificada a través de la velocidad de la onda cortante en análisis dinámicos, el módulo de elasticidad del hormigón utilizado en la cimentación además del tipo [8] y forma de aplicación de las cargas [9]. Se ha comprobado que la ISE modifica: la respuesta estructural de las edificaciones, generando cambios en los periodos de oscilación [10, 11], el amortiguamiento de las cimentaciones [12] y en los desplazamientos [13], además provoca redistribución de las fuerzas interiores de los elementos estructurales [9, 14]. La mayoría de los estudios sobre ISE se han desarrollado para edificaciones grandes [3, 9, 15-17], este trabajo tiene como objetivo determinar si la ISE tiene algún impacto en una edificación de baja altura, para ello se compararon los resultados de fuerzas interiores y desplazamientos entre una edificación pequeña, idealizada con apoyos rígidos y luego con ISE. La ISE fue tenida a través de un modelo numérico computacional continuo.

2. DESCRIPCIÓN DE LA EDIFICACIÓN

La edificación objeto de estudio consta de dos niveles y ocupa un área en planta de 195m² aproximadamente, con sistema constructivo mixto compuesto por muros de carga y losas apoyadas sobre columnas directamente. Los muros son de bloques de 15cm y las columnas y losas de hormigón armado con 35MPa de resistencia a compresión. Las secciones de las columnas son de 25x25cm y 25x40cm y el espesor de las losas de 30cm. Las uniones entre los elementos estructurales son continuas, en la figura 1 se muestra el modelo numérico de la edificación.

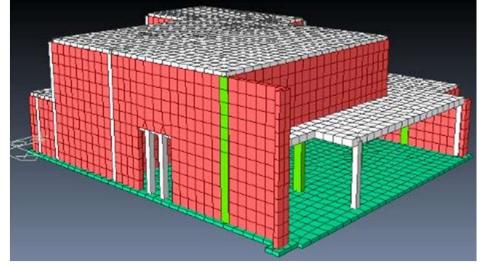


Figura 1: Modelo numérico de la edificación objeto de estudio

Para esta edificación solo se consideró la influencia de las cargas gravitatorias debido a la presencia de muros de cargas que toman las cargas laterales generadas por la fuerza del viento. La carga de uso fue de 2 kN/m² para las habitaciones y 1 kN/m² para la cubierta, como cargas permanentes se tiene valores que oscilan entre 1,3 y 8,4 kN/m² porque hay presencia de jardineras en el entrepiso de la edificación.

La edificación se encuentra sobre un estrato de suelo firme, más abajo se encuentra un estrato de un suelo muy deformable al que sigue un suelo arcilloso, las propiedades y parámetros resistentes de los estratos de suelos que sirven de soporte se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades de los suelos

Estrato	Espesor (m)	Peso específico (kN/m³)	Módulo elástico (E), kPa	Cohesión (C), kPa	Ángulo de fricción (Ø)	Coeficiente de Poisson
I	0-1,8	18,4	49000	0	35	0,25
II	1,8-3,6	14	1000	10	0	0,45
Ш	3,6-25	16	25000	50	3	0,35

Para modelar el suelo empleando el método de los elementos finitos es necesario proveer al modelo de características tenso-deformacionales representadas a través de los modelos constitutivos que tengan en cuenta el comportamiento elasto-plástico del suelo. Estos modelos deben estar en función del tipo de análisis que se desee hacer (estático o dinámico) [2]. Se han desarrollado una serie de modelos de comportamiento elastoplásticos teniendo en cuenta los distintos criterios de falla, el más empleado para describir los problemas de ISE es el de Mohr-Coulomb. Este modelo está definido por un comportamiento elastoplástico, es considerado como una aproximación de primer orden al comportamiento no lineal del suelo, que relaciona la ley de Hooke y la forma generalizada de falla de Mohr-Coulomb, en la que se puede simular el comportamiento de suelos. Por su relativa simplicidad y su carácter general es uno de los más empleados en los problemas de ISE en general [18, 19] y es el seleccionado para describir el comportamiento de los diferentes estratos de suelo en este trabajo.

3. CONDICIONES DE APOYO

En este estudio se evalúa la influencia que tiene la ISE en las fuerzas interiores de la edificación, para ello se modelará una variante donde el edificio se encuentre empotrado y otra donde el efecto de la interacción sea tenido en cuenta a través de un modelo numérico continuo (donde el suelo y la edificación son modelados en un solo paso). En este tipo de modelos es necesario definir la geometría de la cimentación que inicialmente será una losa de 15cm de espesor, en el contacto de la losa con el suelo de apoyo se crean elementos de interfase. Los elementos de interfaz permiten los desplazamientos diferenciales entre los pares de nodos (deslizando y separando), de esta manera es que se incorpora el efecto de interacción. Uno de los modelos se desliza mientras el otro se separa. [20], esto se usa para simular la interacción entre el suelo y el cimiento. En este caso la generación de los elementos de interfase separa los nodos que estaban conectados en una posición y crea un elemento nuevo entre el suelo y la losa. La secuencia de análisis se hizo por etapas constructivas, en la inicial en donde aún no hay interacción por solo considerarse al suelo en su estado natural, la interfase no es necesaria y se deben asignar vínculos rígidos a los nodos que quedan separados debido a la interfase para evitar errores, en la etapa de interacción este vínculo debe ser removido. El material de la interfase está regido por la rigidez de los elementos adyacentes a través de los módulos de rigidez normal (1) y el tangencial (2). La interfaz de la losa fue estimada automáticamente por la herramienta computacional usando las propiedades de los elementos adyacentes (suelo y cimiento)

$$K_n = \frac{E_{oed,i}}{t_v} \tag{1}$$

$$K_t = \frac{G_i}{t_v} \tag{2}$$

Donde:

R: Coeficiente de reducción de rigidez (de 0,7 a 1 para el contacto arcilla-hormigón), en este caso asumió un valor de 0,8

 C_i , G_i y $E_{oed,i}$ cohesión, módulo cortante y módulo edométrico reducidos (3-5).

 t_v : Espesor virtual de la interfase, generalmente tiene un valor entre 0,01 y 0,1, cuanto mayor sea la diferencia de rigidez entre un elemento u otro, menor su valor, en este caso como la diferencia entre el suelo y el hormigón es significativa se selecciona el valor de 0,01

$$C_i = R \cdot C_{suelo} \tag{3}$$

$$G_i = R \cdot G_{suelo} \tag{4}$$

$$E_{oed,i} = \frac{2 \cdot G_i (1 - v_i)}{(1 - 2v_i)} \tag{5}$$

 v_i : Coeficiente de Poisson de la interfase, vale 0,45 para la interfase, se emplea este valor para simular el comportamiento friccional no compresible y evitar errores numéricos.

En el modelo con interacción, se generan valores de asentamiento diferenciales en algunas zonas que producen valores de distorsiones angulares que superan las exigencias establecidas para el diseño, por esta razón se decide colocar pilotes helicoidales de acero con 4,85m de longitud bajo la losa de cimentación para analizar cómo influyen en la ISE.

Estos pilotes rigidizan la losa y para simular el efecto de interacción se incorporan elementos de interfase al igual que en la losa. Se les asigna la capacidad de carga en punta del pilote que es desarrollada por la hélice (de 300mm de diámetro), con un valor de 150kN para cada pilote, se colocaron 58 pilotes de sección tubular de acero con diámetro exterior igual a 73mm. Fueron dispuestos en las zonas de concentración de tensiones que es donde aparecen los mayores desplazamientos en el modelo donde solo existe la losa como solución de cimentación. Por simplicidad se transforman los pilotes helicoidales a pilotes de sección circular maciza equivalente con 20cm de diámetro, en la Figura 2 se muestra el modelo con los pilotes ya incorporados.

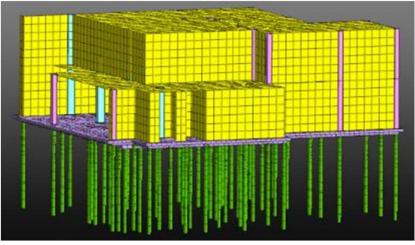


Figura 2: Modelo de losa con pilotes

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para determinar la influencia que tienen la interacción suelo-estructura en la respuesta estructural de la edificación es necesario establecer las variables que serán consideradas en la evaluación

La fuerza axial fue evaluada en la base de dos columnas ubicadas en distintos puntos de la base de la edificación, en la figura 3 se muestran los resultados obtenidos para el modelo de ISE con losa de cimentación solamente.

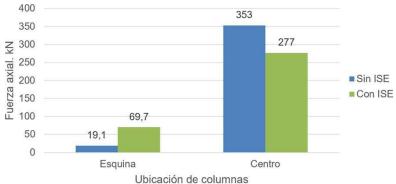


Figura 3: Fuerza axial en columnas

De los resultados obtenidos es evidente que la interacción redistribuye las cargas en la estructura, provocando un incremento de la carga en un caso (columna de esquina) y disminuyéndola en otro (columna centrada) con diferencias del 72% para la columna de esquina y 27% para la columna del centro. Por tanto, el efecto de la interacción suelo- estructura en la fuerza axial de las columnas es significativo.

Los momentos flectores en las losas de entrepiso y la cubierta de la superestructura fueron evaluados, los resultados se muestran en la figura 4.

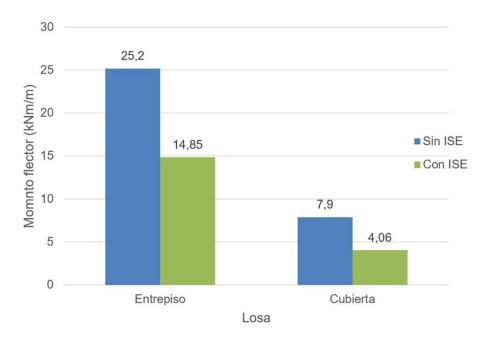


Figura 4: Momentos flectores en losas

Los resultados muestran que los valores de momentos flectores en las losas de la edificación disminuyen cuando se considera la interacción suelo estructura en un 41% para la losa de entrepiso y 48% para la de cubierta, por lo que la no consideración de la interacción da un enfoque más conservador en este caso.

La fuerza cortante en las losas fue evaluada para comprobar el efecto que tiene la interacción en esta solicitación, en la figura 5 se muestran los resultados obtenidos

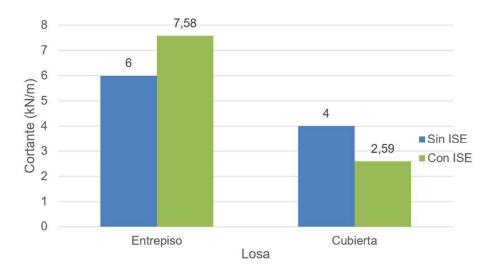


Figura 5: Fuerza cortante en losas

Si bien en términos absolutos las diferencias no son significativas, en términos relativos las diferencias son grandes, del orden del 20% para el entrepiso y del 35% para la cubierta. También se evaluó las fuerzas en los elementos estructurales superficiales (muros y losas) de la superestructura, en las figuras 6 y 7 se muestran los resultados obtenidos para diferentes puntos de control.

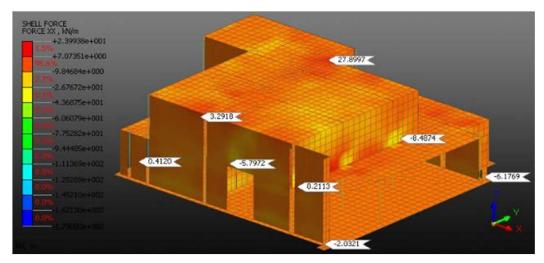


Figura 6: Fuerzas membranales en el modelo sin ISE

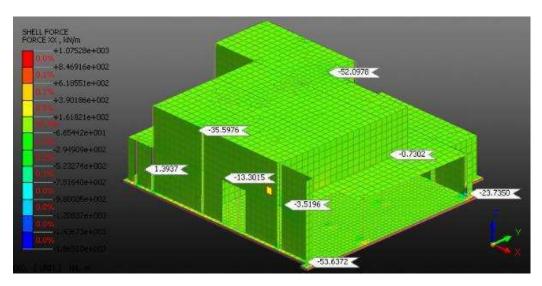
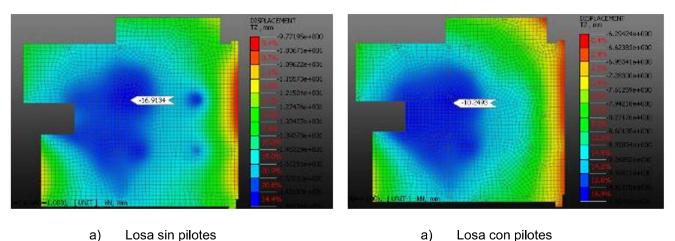


Figura 7: Fuerzas membranales en el modelo con ISE

Los resultados mostrados en las figuras 6 y 7 confirman que el efecto de la ISE también influye en los elementos estructurales superficiales de forma considerable, con grandes incrementos de fuerza cuando se tiene en cuenta la ISE. La razón por la que esto ocurre se debe a que el cambio en las condiciones de apoyo que representa la ISE, hace que se redistribuyan los esfuerzos en la superestructura modificando las solicitaciones actuantes.

Se verifica si la incorporación de pilotes disminuye los asentamientos en la cimentación, se toma como referencia al valor máximo que se encuentra en la zona central de la edificación, en la figura 8 se muestran los resultados obtenidos.



a)

Figura 8: Asentamientos en la cimentación

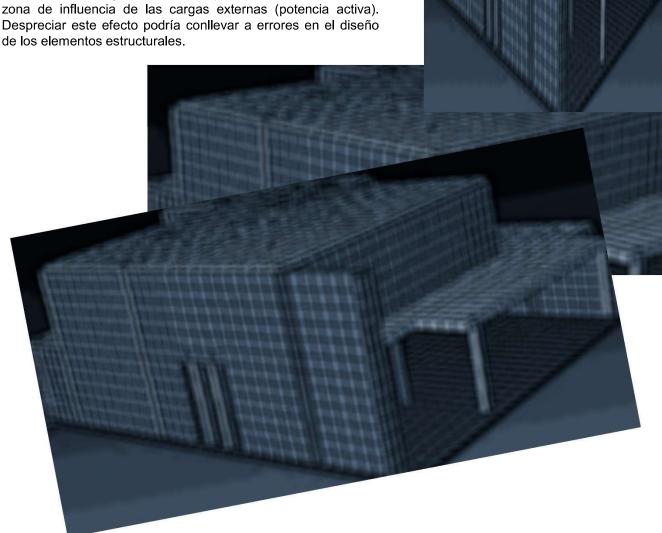
a)

En la figura 8 se observa que el asentamiento para el modelo sin pilotes es de 16,91mm, mientras que para el modelo con pilotes es de 10,25 mm, entonces se comprueba que la incorporación de pilotes en el modelo de la edificación y cumplen su función como reductores de asentamientos, reduciéndose estos en un 40%.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó el efecto de la ISE sobre una edificación pequeña con cargas relativamente bajas, para cuantificar su efecto se tuvo en cuenta un modelo con apoyos rígidos y otro donde el efecto de la ISE fue tenido en cuenta a través de un modelo numérico computacional continuo, donde la estructura y el suelo fueron modelados en un solo paso.

Los resultados obtenidos mostraron que la interacción sueloestructura influye de manera significativa en la respuesta estructural de la edificación, a pesar de su baja altura y tener cargas relativamente bajas. Tanto en las columnas, como en los elementos de soporte horizontal, la redistribución de tensiones que provoca la interacción con el suelo de soporte modifica los valores de fuerzas interiores en los distintos elementos, esto demuestra la importancia de modelar el efecto de interacción en el análisis de estructuras apoyadas sobre estratos deformables. La incorporación de pilotes tiene un efecto favorable en la reducción de asentamientos disminuyendo estos en un 40%. Por tanto, la interacción suelo estructura debe considerarse en el análisis de edificaciones aun cuando sean de pocos niveles, si se encuentran apoyados sobre estratos muy deformable o que aparezcan dentro de la zona de influencia de las cargas externas (potencia activa). Despreciar este efecto podría conllevar a errores en el diseño



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1. E. Kausel, "Early history of soil–structure interaction," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 30, no. 9, pp. 822-832, 2010.
- V. Garg and M. Hora, "A review on interaction behaviour of structure-foundation-soil system," system, vol. 2, no. 6, 2012.
- 3. F. Cavalieri, A. A. Correia, H. Crowley, and R. Pinho, "Dynamic soil-structure interaction models for fragility characterisation of buildings with shallow foundations," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 132, p. 106004, 2020/05/01/2020.
- G. Zani, P. Martinelli, A. Galli, and M. di Prisco, "Three-dimensional modelling of a multi-span masonry arch bridge: Influence of soil compressibility on the structural response under vertical static loads," Engineering Structures, vol. 221, p. 110998, 2020/10/15/ 2020.
- 5. P. M. Yesane, Y. Ghugal, and R. Wankhade, "Study on soil-structure interaction: a review," International Journal of Engineering Research Volume, no. 5, pp. 737-741, 2016.
- B. Shirkhanghah and H. Eimani Kalehsar, "The effect of soil-structure interaction on the alongwind response of high-rise buildings," Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, pp. 1-15, 2020.
- 7. J. Chen, "Soil-Structure Interaction Effects on Wind-induced Vibration of Transmission Tower Line System," EJDE, vol. 21, p. 12, 2016.
- 8. A. M. Halabian, M. El Naggar, and B. J. Vickery, "Reliability analysis of wind response of flexibly supported tall structures," The Structural Design of Tall Special Buildings, vol. 12, no. 1, pp. 1-20, 2003.
- 9. S. Dixit, S. P. Vedula, and S. Kakaraparthi, "Soil-Structure Interaction Analysis of a Raft Foundation Supporting RC Chimney," Geohazards, pp. 259-282, 2020.
- H. J. Shah and A. K. Desai, "Dynamic Analysis of Innovative Hybrid Wind Mill Tower with Soil Structure Interaction," International Journal of Engineering and Technology, vol. 10, no. 5, 2018.
- V. Krathe and A. M. Kaynia, "Implementation of a non-linear foundation model for soil-structure interaction analysis of offshore wind turbines in FAST," Wind Energy, vol. 20, no. 4, pp. 695-712, 2017.
- 12. J. K. Galsworthy and M. H. E. Naggar, "Effect

- of foundation flexibility on the across-wind response of reinforced concrete chimneys with free-standing liners," Canadian geotechnical journal, vol. 37, no. 3, pp. 676-688, 2000.
- 13. Z. Zhou, X. Wei, Z. Lu, and B. Jeremic, "Influence of soil-structure interaction on performance of a super tall building using a new eddy-current tuned mass damper," The Structural Design of Tall Special Buildings, vol. 27, no. 14, p. e1501, 2018.
- I. Venanzi, D. Salciarini, and C. Tamagnini, "The effect of soil–foundation–structure interaction on the wind-induced response of tall buildings," Engineering structures, vol. 79, pp. 117-130, 2014.
- M. A. E. Al-Hamdani and M. M. Hamid, "Influence of soil structure interaction on wind flow of tall building frames," in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 737, no. 1, p. 012039: IOP Publishing.
- E. C. Alves and I. A. Feitosa, "Analysis of the global tall buildings stability in flat slabs considering the soil structure interaction," Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, vol. 13, pp. 183-199, 2020.
- 17. O. S. Qaftan, T. Toma-Sabbagh, L. Weekes, and L. Augusthus-Nelson, "Validation of a finite element modelling approach on soil-foundation-structure interaction of a multistorey wall-frame structure under dynamic loadings," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 131, p. 106041, 2020/04/01/2020.
- 18. R. Scarfone, M. Morigi, and R. Conti, "Assessment of dynamic soil-structure interaction effects for tall buildings: A 3D numerical approach," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 128, p. 105864, 2020/01/01/2020.
- F. de Silva, "Influence of soil-structure interaction on the site-specific seismic demand to masonry towers," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 131, p. 106023, 2020/04/01/ 2020.
- 20. A. H. M. Eid, T. Sorour, Y. Zaghloul, M. Ezzat, "Numerical Analysis of Large Diameter Bored Pile Installed in Multi Layered Soil: A Case Study of Damietta Port New Grain Silos Project " p. 9, 2018.